

概要

豊川市の加藤泰男氏が運用するアマチュア無線局（53.1MHz, 10W）が送信する VHF 連続波を流星に照射したときに得られる反射信号を USB 型式で受信する流星観測法を KRO(注 1)と呼称している。この観測法で得られる流星のヘッドエコー波形(注 2)は様々であるが、その中には本来の形から極端に曲がり変形しているものがある。筆者らはその原因の一つに流星の大きな減速があるだろうと考え、そのメカニズムについて数理的に確かめた。

緒言

KRO では流星のヘッドエコーと考えられる各種のドップラーシフト波形が観測されているので、それらの分類と発生原因の究明に努めている。大気の薄い電離層の中で起こる流星のふるまいは、大きく分けて電波工学・大気物理学あるいは運動力学的な原因があると思われる。本報は特に力学的な原因で起こる流星の減速によるドップラーシフトを内包した周波数解析波形の変化について考察した。

考察への手順

ドップラー周波数はその理論が教えるとおおり、運動する物体が観測者に接近するとそれは高くなり、逆に遠ざかると低くなる。送信された 53.100000 MHz の電波を、受信機の周波数を 53.099000 MHz に同調し、電波型式 USB で受信すると、送信信号は 1000 Hz の音として聞こえる。流星本体の対地速度に応じたヘッドエコーのドップラー周波数が得られれば、流星が受信点に接近しているときには 1000Hz の周波数よりも高い音が、遠ざかっているときには 1000Hz の周波数より低い音が受信機から聞こえる。

いま、送信周波数 f_0 、流星の速度 v 、光速を C とし、流星の進行方向と観測者のなす角度を θ とすると、ドップラー周波数 f_d は、

$$f_d = 2f_0 \cdot v \cdot \cos \theta / C \quad (1)$$

で求められる。

送信周波数 f_0 は 53.1MHz であるが、

$$2f_0 / C = k \quad (2)$$

と定数化すると(1)は

$$fd=k \cdot v \cdot \cos \theta \quad (3)$$

となって速度 v と角度 θ の関数として扱うことができる。

この KRO 方式で捉えられる流星のほとんどは $\theta \geq 86^\circ$ (注 4)であることがこれまでの観測で判明しているので、 $90^\circ > \theta \geq 86^\circ$ の範囲で、 fd の変化を調べればよい。

減速モデルの作成

「ケース 1」 速度 v が一定のとき

fd は $\cos \theta$ に従うから図 1 のようになる。 $90^\circ > \theta \geq 86^\circ$ の範囲では図 2(便宜上 85° 以上を図示した)のようになる。

「ケース 2」 速度 v が変化するとき。現実的には大気との摩擦ならびに流星物質の崩壊などで速度は減る。その減速の作用は、同一流星を複数地点から観測して実経路を求め、微小時刻ごとに経路長を調べると指数関数的であることがすでに知られている(注 3)。

その特徴は、初速を v_0 、時間 t の関数で(4)のように与えられる。

$$v=v_0-A \cdot \exp(Bt) \quad (4)$$

但し、 A と B は定数。

一般的にこの関数のグラフは図 3 のようになる。

ここで(3)、(4)から

$$fd=k\{v_0-A \cdot \exp(Bt)\} \cdot \cos \theta \quad (5)$$

が導かれる。これが流星のドップラー周波数の減速モデルである。

数値代入とその評価や今後の課題

さて式(5)に適当に A と B を定めて代入すればよいのだが、流星の減速がいつから開始しているのかはそれぞれ異なる。そこで開始タイミングをいくつか決めて式(5)の形を調べることとした。定数 A と B は実際の観測例(注 4)を参考に、 $A=0.13$ 、 $B=0.10$ とした。

この場合、流星の速度は指定せず、速度の変化度合いを用いて正規化して、ドップラー周波数 fd の変化を調べた。

ここでいう変化度合いは減速量 $A \cdot \exp(Bt)$ である。減速の開始タイミングを $\theta < 86^\circ$ として以下の場合を計算して比較した。

① 72° 開始、 86° 終了

- ② 74° 開始、88° 終了
- ③ 76° 開始、90° 終了
- ④ 78° 開始、92° 終了
- ⑤ 80° 開始、94° 終了

これらの変化の様子を図4に示す。減速しない場合(図中では $\cos \theta$ で表示した)と比較するとこれら減速した場合はどれも図の下側に曲がっているのがわかる。実際の観測波形と比較しやすいように拡大した図5を見れば図6の観測波形によく似ていることが見てとれる。

また、減速の度合いをもっと大きくするとこの曲がり急峻になると思われるが、どの程度の減速でどのくらいの曲がりになるのかは今回の検討に含まれていない。加えてこの曲がり具合の急峻度の分類や観測される比率も今後の課題としたい。

今回は運動力学的な原因に限ったが、流星の減速に電波工学的ないしは大気物理学的な影響が全くないとは断言できないので、これらも今後の課題にすべきであろう。

結論

ドップラーシフト波形の中で曲がりが出る原因のひとつに流星の急激な減速が影響していることがわかった。但し、前述したようにいくつか検討すべき今後の課題もある。以上。」

(注1) Katoh's Radio Observation の略。加藤泰男氏の貢献に敬意を表した略称。

(注2) ヘッドエコーとして記録しているが、ここでは流星本体と同速度で運動する電離体も含んだものを流星としている。

(注3) 天文回報№316(2020年8月分)。TV観測部門報 上田昌良、8節、隕石落下の可能性ある火球。日本流星研究会

(注4) アストラルシリーズ3「流星II」84ページの図 斎藤馨児、長沢 工編 恒星社厚生閣。

図1 減速ない場合の(fd)変化

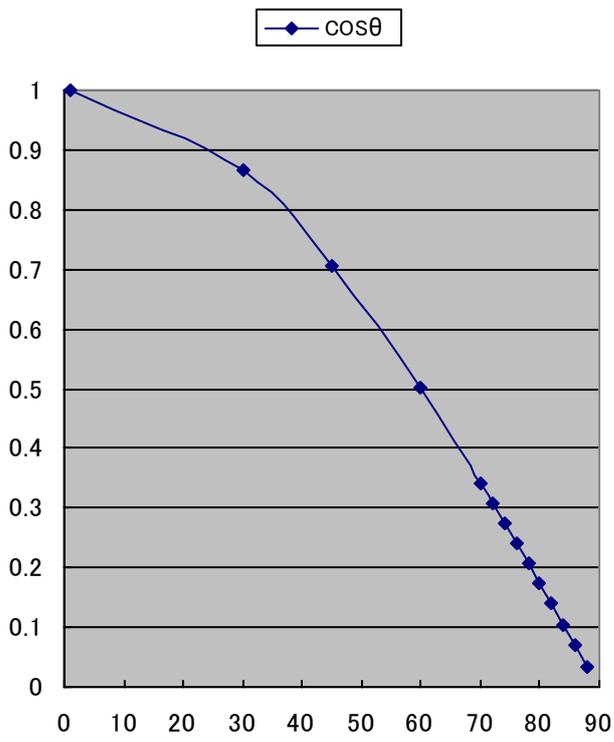


図2 減速ない場合の(fd)変化拡大

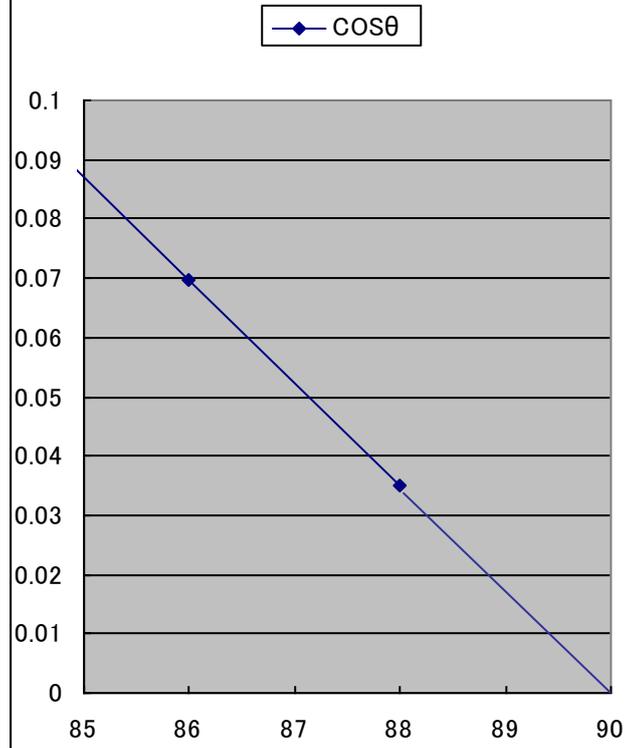


図3 減速量 $-A \cdot \exp(Bt)$ の変化(例 $A=0.15$ $B=0.1$).

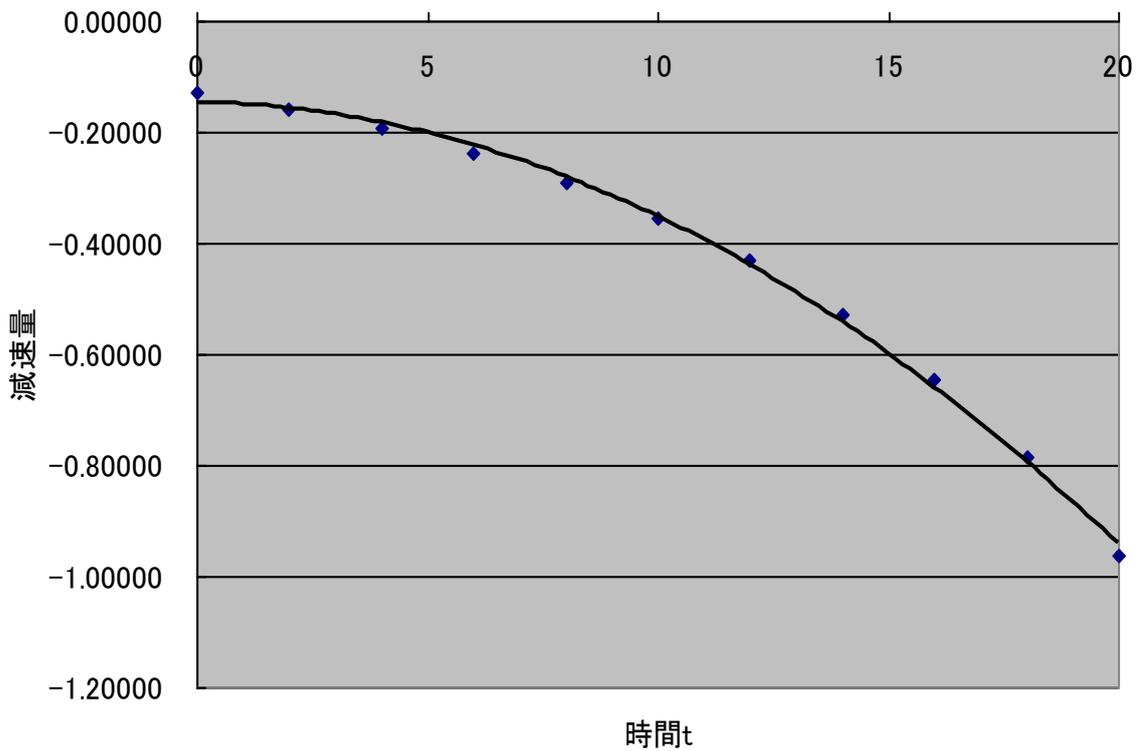


図4 減速開始時と $\cos\theta$ (fd)変化

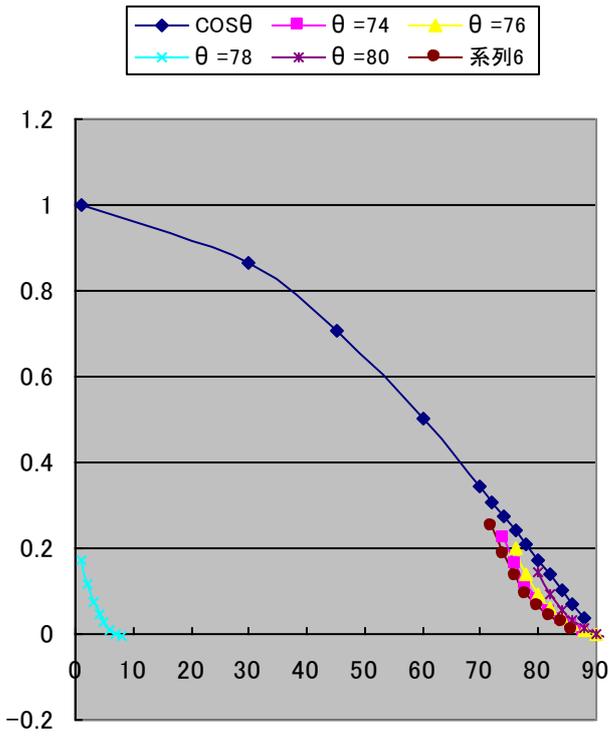


図5 減速開始時と $\cos\theta$ (fd)変化拡大

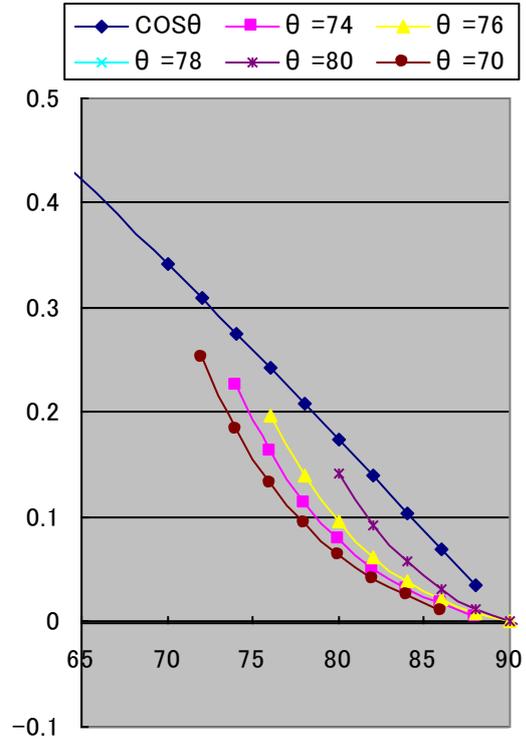
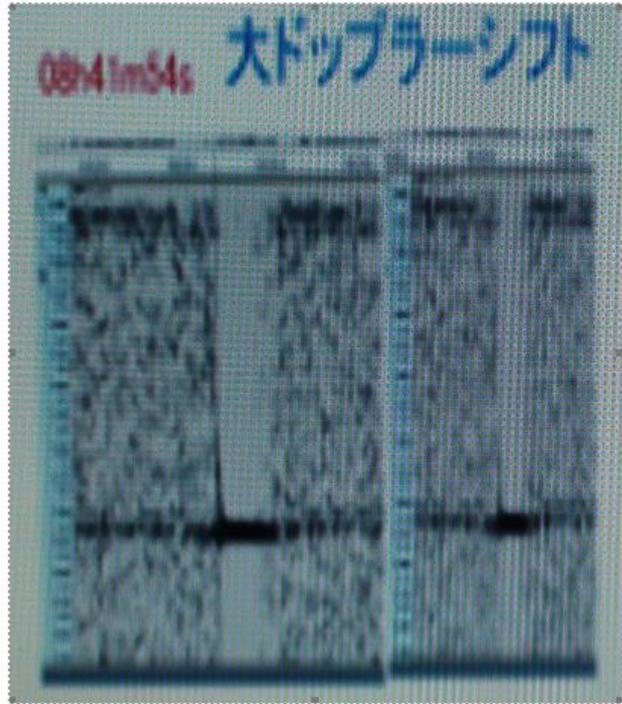
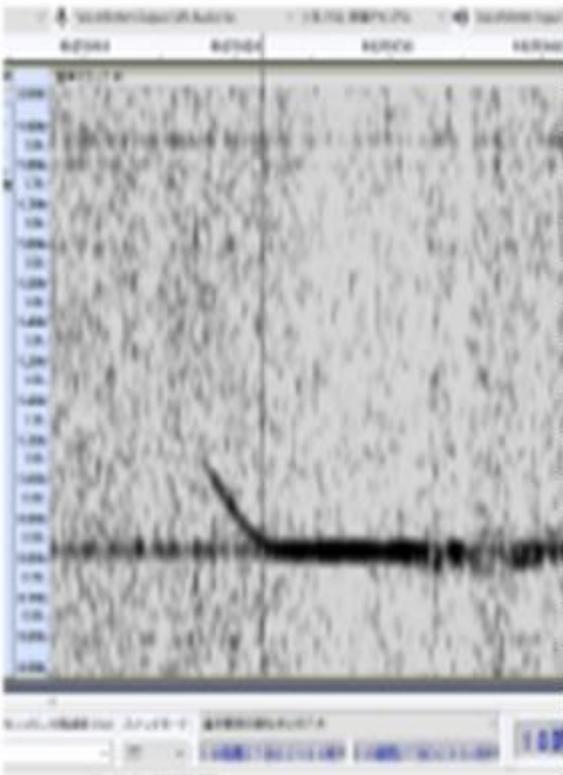


図6 実際の観測波形(鈴木和博)

08h56m58s



2022年8月に公開された標準的波形(鈴木和博)